

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН»*

СКВАЖИННЫЕ УРОВНЕМЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В СИСТЕМЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА КАМЧАТКЕ

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

*gala@emsd.ru, boldina@emsd.ru,
www.emsd.ru/lgi*

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 18-05-00337 и 18-05-00133

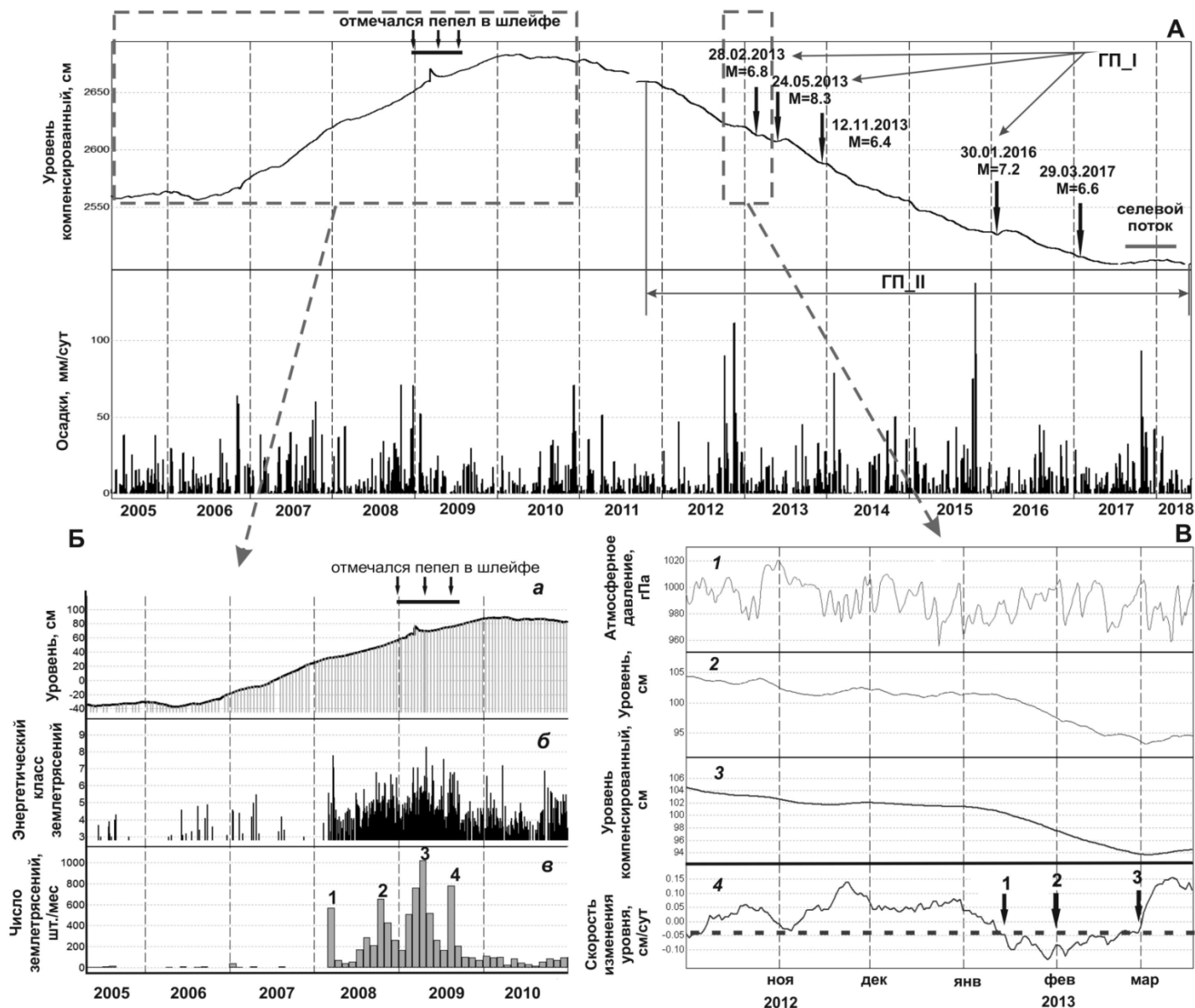
*г. Петропавловск-Камчатский
29 сентября-5 октября 2019 г.*

Введение

Развитие метода скважинных гидрогеодинамических наблюдений, как элемента комплексного геофизического мониторинга и поиска предвестников землетрясений, включает создание новых способов обработки и интерпретации экспериментальных данных, обеспечивающих надежную диагностику сигналов подготовки землетрясений (гидрогеодинамических предвестников ГП), а также расширение представлений о флюидодинамических процессах их формирования.

В докладе рассматриваются два новых метода обработки уровнемерных данных с использованием статистического и приливного анализа, которые расширяют возможности использования данных скважинных уровнемерных наблюдений для выделения средне-краткосрочных аномалий гидрогеодинамического режима наблюдательной скважины.

ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕСЯ В РЕЖИМЕ СКВАЖИНЫ Е-1

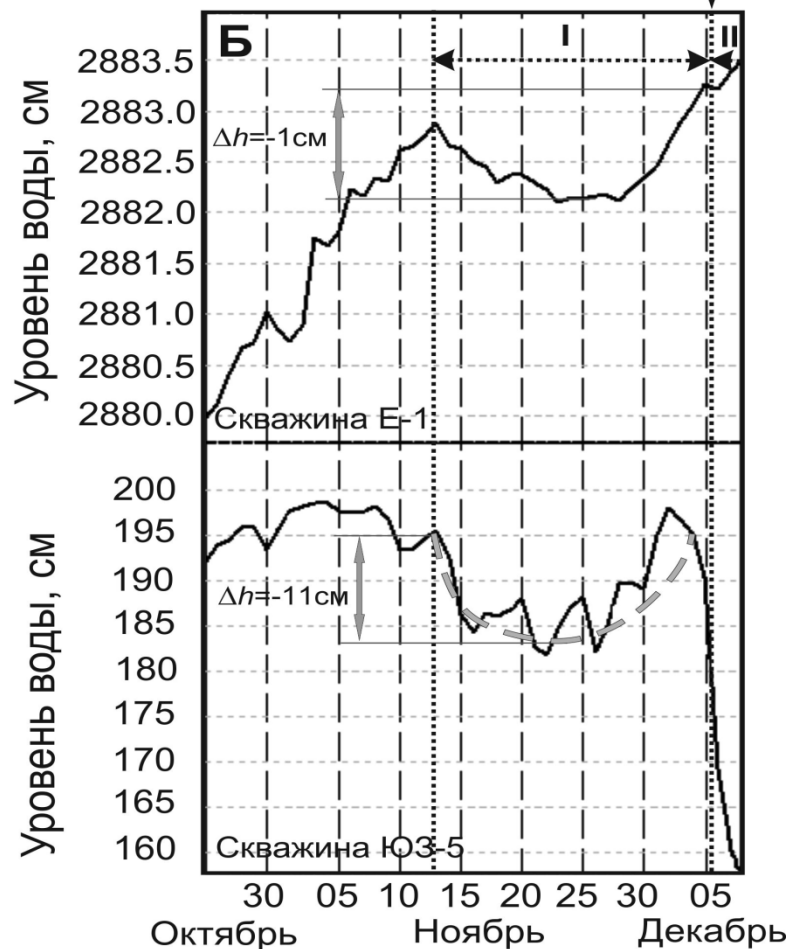


ГП - гидрогеодинамические предвестники:

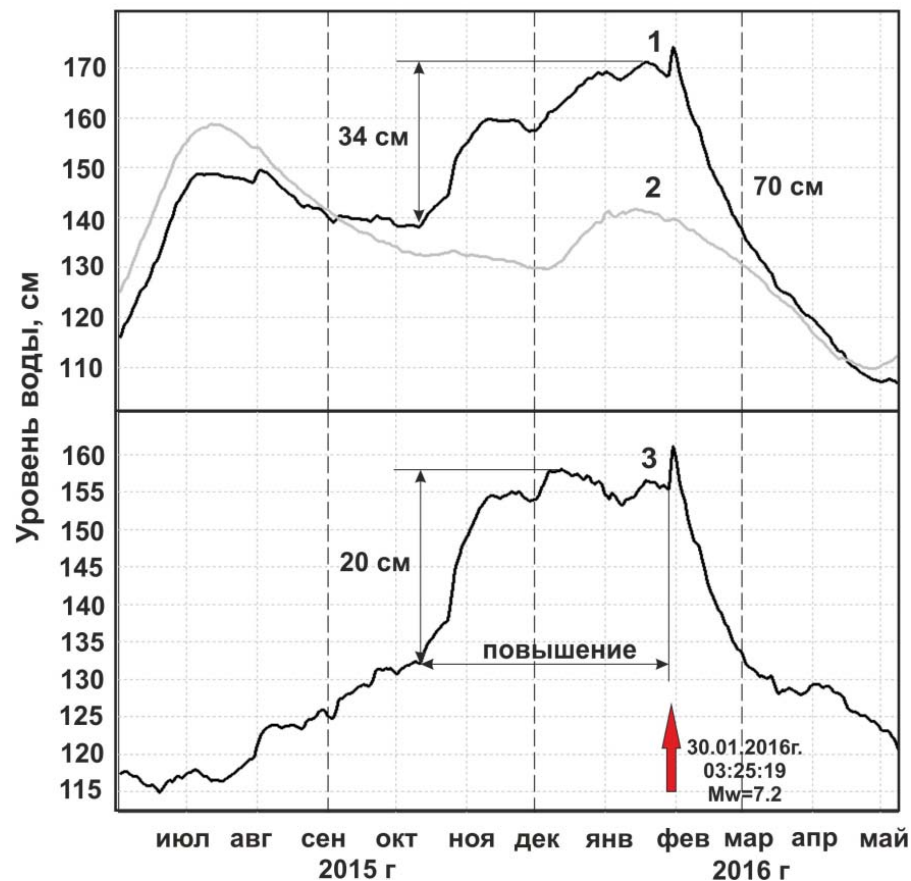
ГП_I с временем упреждения от суток до десятков суток;
 ГП_II с временем упреждения до месяцев - нескольких лет.

Скважина ЮЗ-5: проявления гидрогеодинамических предвестников перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$ и Жупановским землетрясением 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$.

Кроноцкое землетрясение,
05.12.1997г., $M=7.8$, $H=33$ км, $d_e=200$ км,

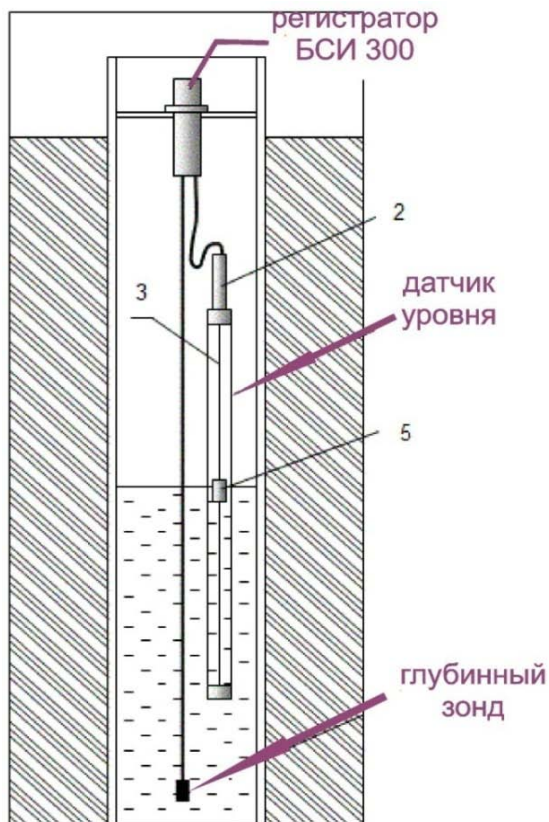


Жупановское землетрясение,
30.01.2016г., $M=7.2$, $H=180$ км, $d_e=80$ км,



Измерительный комплекс Кедр ДМ

Схема размещения оборудования в скважине



Технические характеристики измерительного комплекса Кедр-ДМ [Кедр-ДМ: комплекс для мониторинга..., 2007]

Регистратор БСИ 300	
Диапазон установки интервала измерений	5 - 60 минут
Разрешающая способность датчика атмосферного давления	0.1 гПа (0.1 см вод. ст.)
Разрешающая способность датчика температуры воздуха	0.1° С
Напряжение питания (постоянный ток)	8-15 В
Датчик уровня	
Разрешающая способность датчика уровня	0.01 см (0.1 см)
Основная погрешность измерения уровня	0.5 %
Глубинный зонд	
Разрешающая способность датчика температуры воды	0.01° С
Погрешность измерения температуры воды в диапазоне 0-100° С	0.5 %
Разрешающая способность датчика электропроводности воды	1 мСм/м
Диапазон измерения электропроводности	2-2000 мСм/м

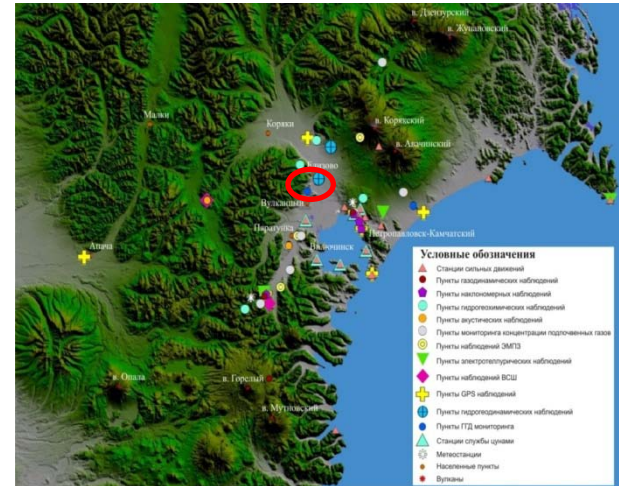
Интервал регистрации параметров – 5 минут

Передача данных по каналам сотовой связи – 1 раз в час.

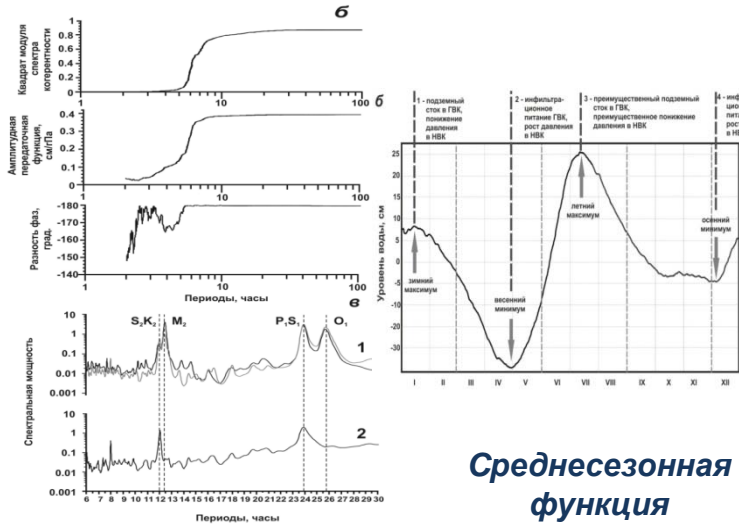
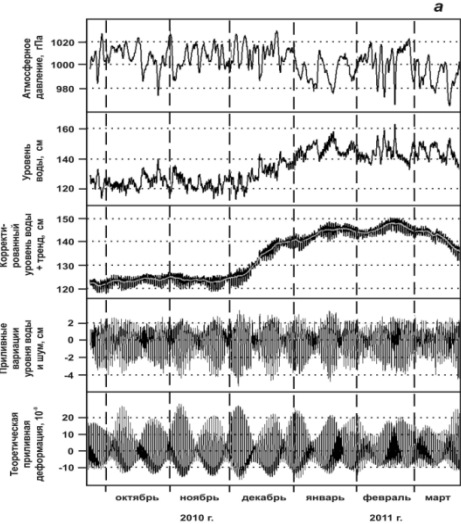
Обработка данных производится ежедневно.



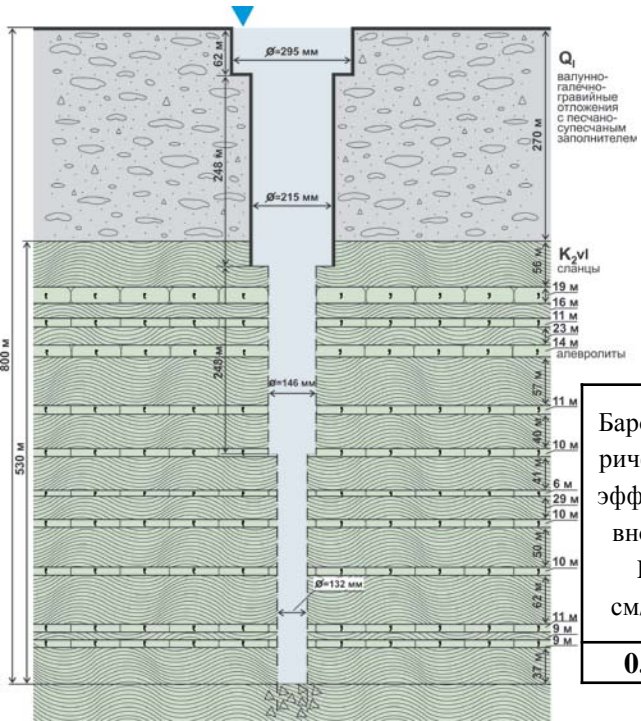
Схема расположения скв.ЮЗ-5



Характеристика уронемерных данных
(Болдина, Копылова, 2013; и др.)



Строение скв. ЮЗ-5



Данные наблюдений

Барометрический и приливной отклик уровня воды

Среднесезонная функция изменений уровня воды

Упругие и фильтрационные параметры водовмещающих пород (Копылова, Болдина, 2012)

Барометрическая эффективность E_b см/гПа	Приливная чувствительность A_v м/10 ⁻⁷	Сжимаемость β Па ⁻¹ ·10 ⁻¹¹	Модуль сдвига G Па·10 ¹⁰	Коэффициент Скемптона B	Удельная упругая емкость S_s м ⁻¹ ·10 ⁻⁷	Пористость ϕ	Водоотдача S	Водопроницаемость, T , м ² /сут	Коэффициент фильтрации, $k=T/d$, м/с	Пьезопроводность, $a=k/S_s$ м ² /с
0.40	0.161	12.5	1.34	0.67	16.9	0.11	16.9·10 ⁻⁵	7.8	9·10 ⁻⁷	0.53

Методика исследования ГП в скважине ЮЗ-5

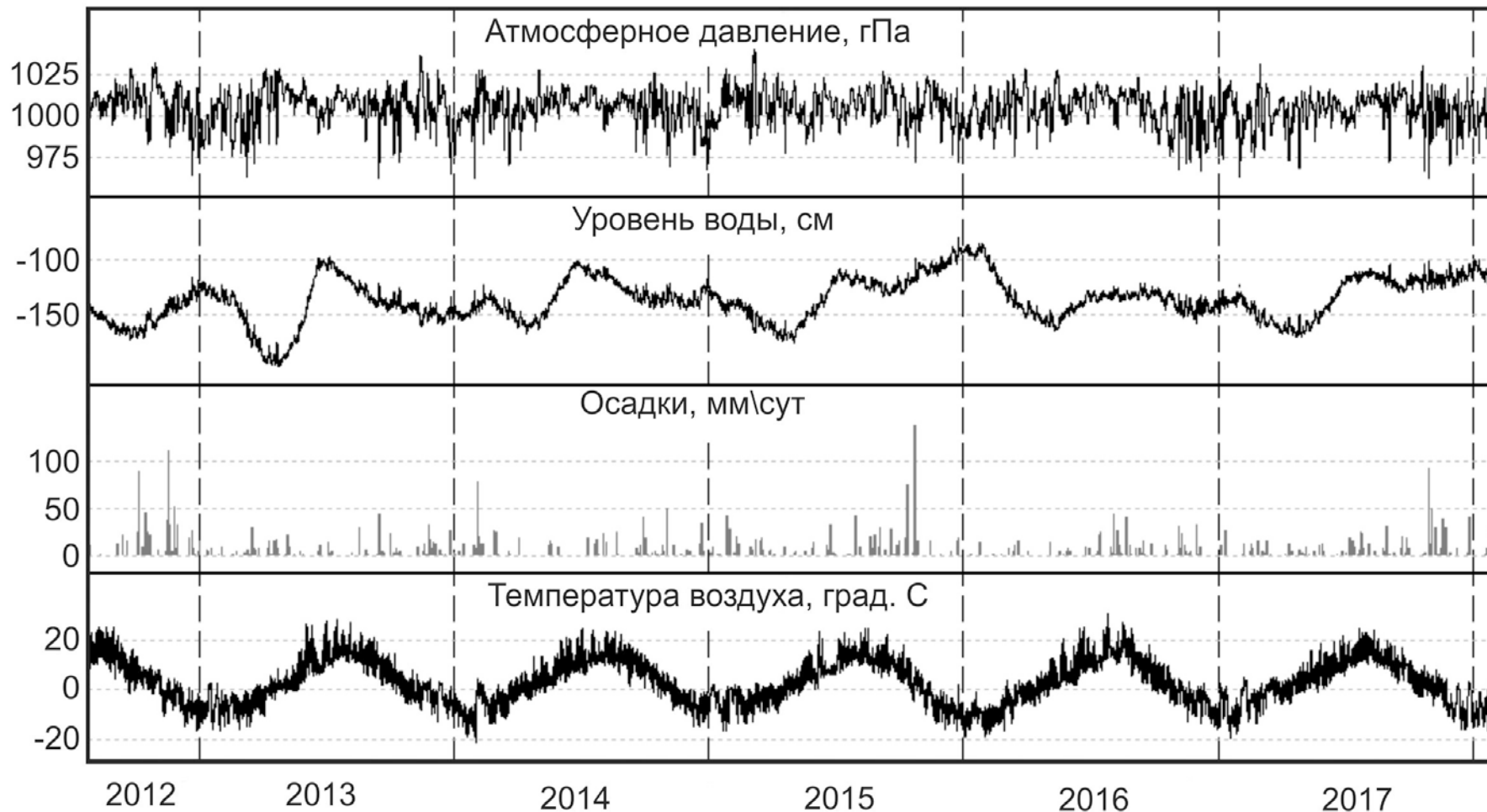
1. - На основе статистического анализа временного ряда 5-минутных уровнемерных данных, после адаптивной компенсации в нем барометрических вариаций, с применением факторного и кластерного анализа к последовательности многомерных векторов восьми статистических свойств ряда наблюдений в последовательных временных окнах длиной одни сутки.

При разработке метода выделения краткосрочных аномалий гидродинамического режима скважины использовались 5-минутные данные регистрации уровня воды и атмосферного давления с 27.07.2012 г по 01.02.2018 г (2015 сут, 580605 5-минутных отсчетов). Данные примечательны высоким качеством, а также тем, что в течение наблюдений произошли пять землетрясений с $M_w = 6.5-8.3$ в Камчатской сейсмоактивной зоне и в западной части Алеутской сейсмоактивной зоны на эпицентральных расстояниях $d_e = 80-700$ км

2. - С использованием вариаций во времени величины барометрической эффективности и параметров приливных волн в изменениях уровня воды.

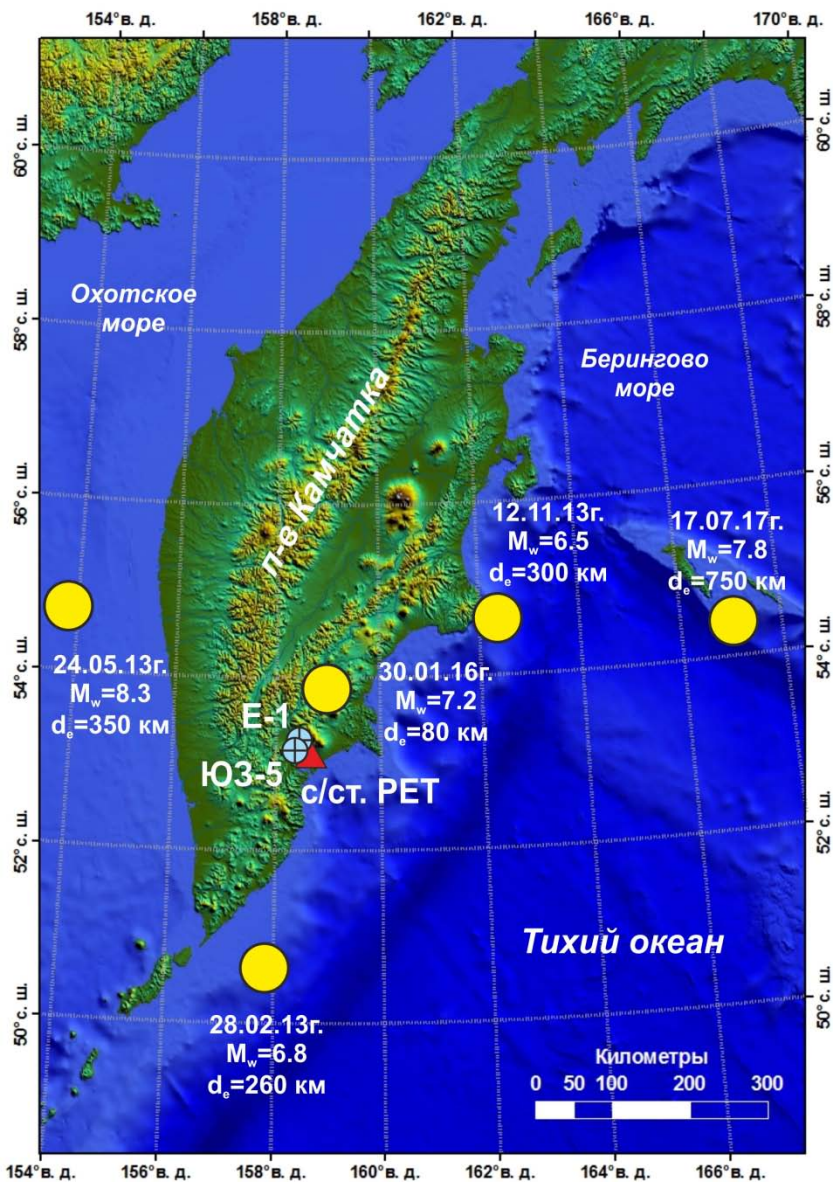
Детальный приливной и барометрический анализ вариаций уровня воды включал расчет RC и параметров суточной группы (O_1 , Q_1) и полусуточной группы (S_2K_2 , N_2 , M_2) приливных волн по среднечасовым вариациям уровня воды. Расчеты проводились по программе ETERNA 3.0 для всего периода наблюдений 27.07.2012 - 03.02.2018 гг. и в скользящем окне 30 сут с шагом 1 сут. В результате были получены временные ряды RC и приливных параметров по отдельным волнам – величин амплитуд, амплитудных факторов и фазовых сдвигов по отношению к соответствующим величинам теоретической деформации в районе скважины, а также отношений сигнал/шум и ошибок определения приливных параметров для всего ряда и в скользящем 30-суточном окне.

Данные наблюдений в скв. ЮЗ-5 с 27.07.2012 по 01.02.2018 гг.



Данные 5-минутных наблюдений за вариациями атмосферного давления и уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 27.07.2012 по 01.02.2018 гг. в сопоставлении с изменениями температуры воздуха и осадками по данным метеостанции Пионерская Камчатского управления по гидрометеорологии и контролю состояния окружающей среды.

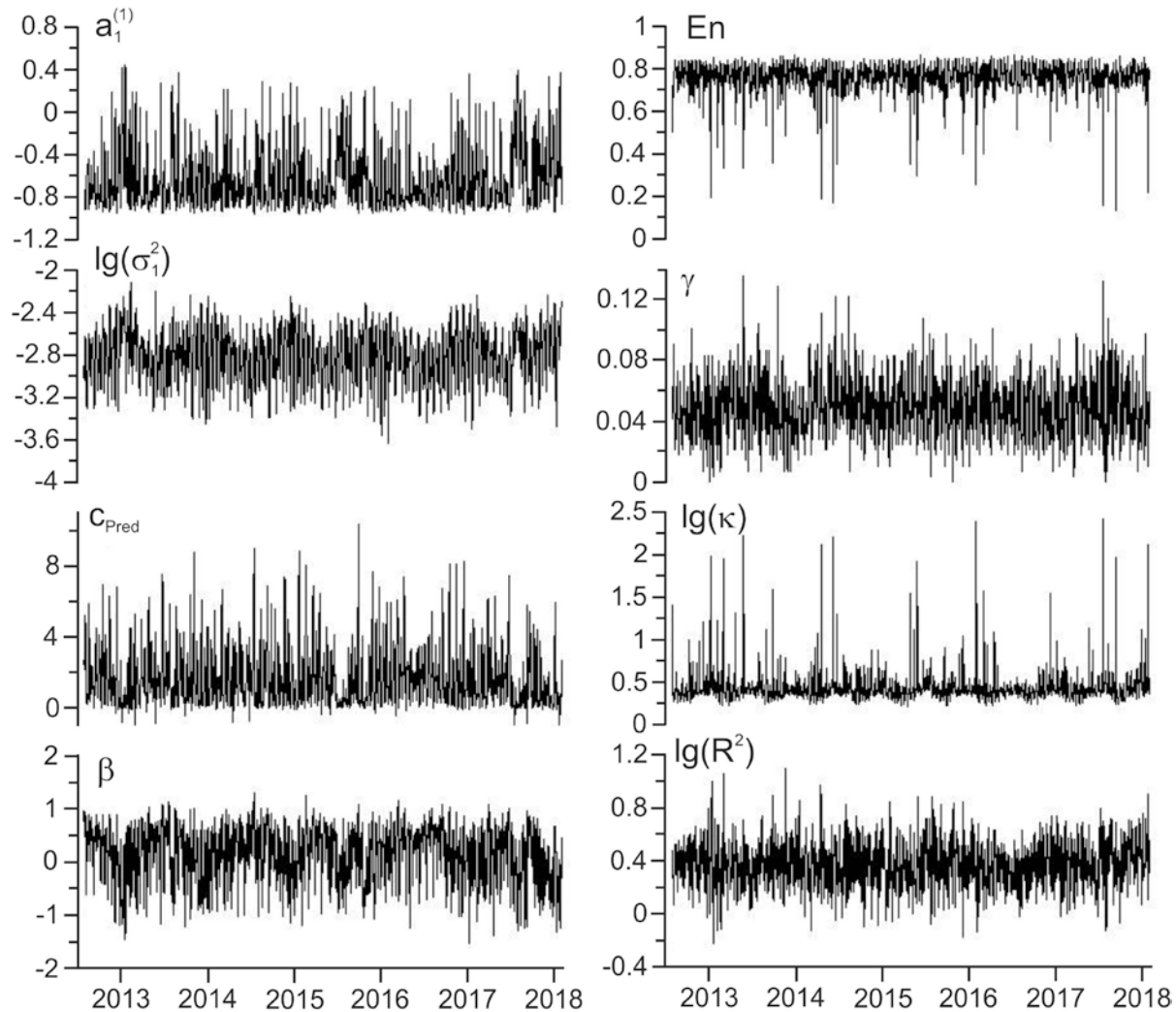
Схема расположения скв. ЮЗ-5, Е-1, с/ст. РЕТ и эпицентров землетрясений



№ п/п	Гипоцентр					Энергетические параметры класс/ магнитуда		Эпицентральное расстояние d_e , км/ интенсивность сотрясений по шкале <i>MSK-64</i>
	дата дд.мм.гггг название землетрясения	время чч:мм	координаты, град		H , км			
			с.ш.	в.д.				
1	28.02.2013	14:06	50.67	157.77	61	15.2	6.8	260/4-5
2	24.05.2013	05:45	54.76	153.79	630	17.0	8.3	348/4
3	12.11.2013	07:04	54.63	162.45	72	15.0	6.5	300/3-4
4	30.01.2016	03:25	53.85	159.04	180	15.7	7.2	80/5
5	17.07.2017	23:34	54.35	168.90	7	16.1	7.8	700/2-3

Параметры сильных землетрясений по
данным
КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/>),
Global CMT (<http://www.globalcmt.org/>),
NEIS (US GS) (<https://earthquake.usgs.gov>)

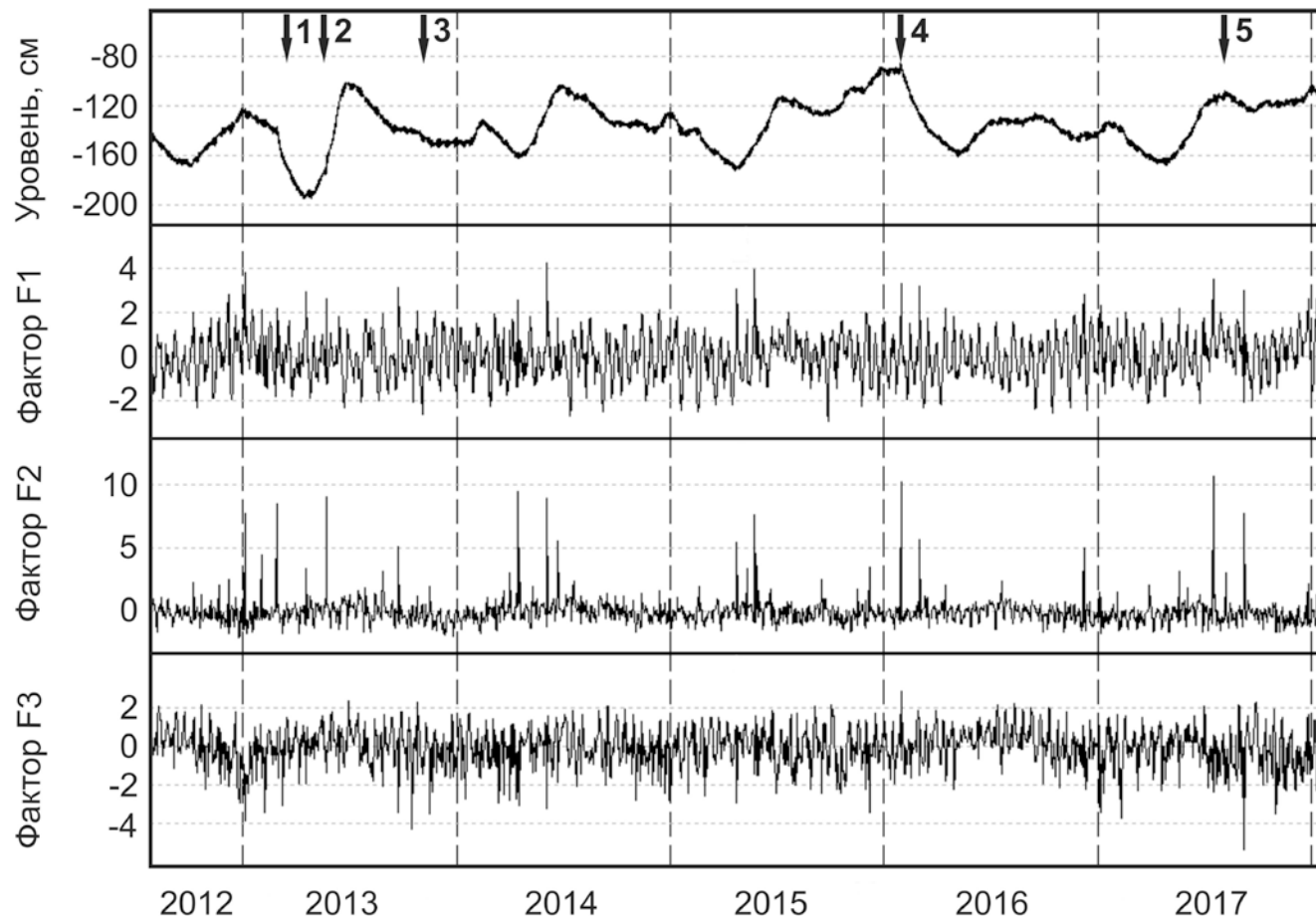
Изменения отдельных компонент 8-мерного вектора параметров



Правый конец временного окна длиной 1 сутки

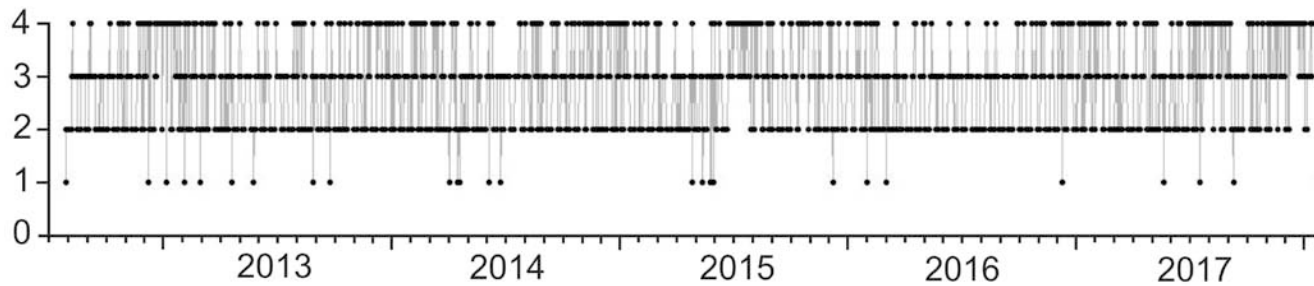
Графики восьми свойств временного ряда приращений уровня подземных вод после компенсации влияния атмосферного давления в последовательных окнах длиной одни сутки.

Общие ортогональные факторы F1, F2, F3

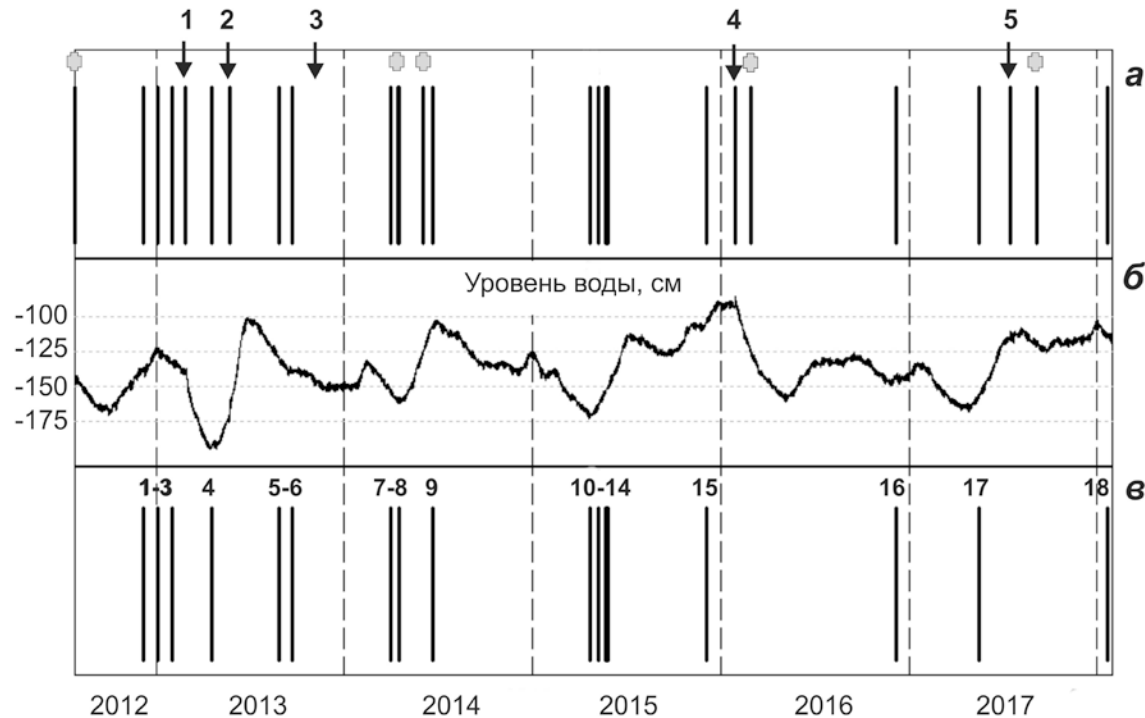


Графики ортогональных общих факторов F1, F2, F3 набора восьми свойств временного ряда уровня воды после компенсации влияния атмосферного давления (верхний график) в последовательных окнах длиной одни сутки. Стрелками показаны землетрясения.

Кластерный анализ ортогональных общих факторов

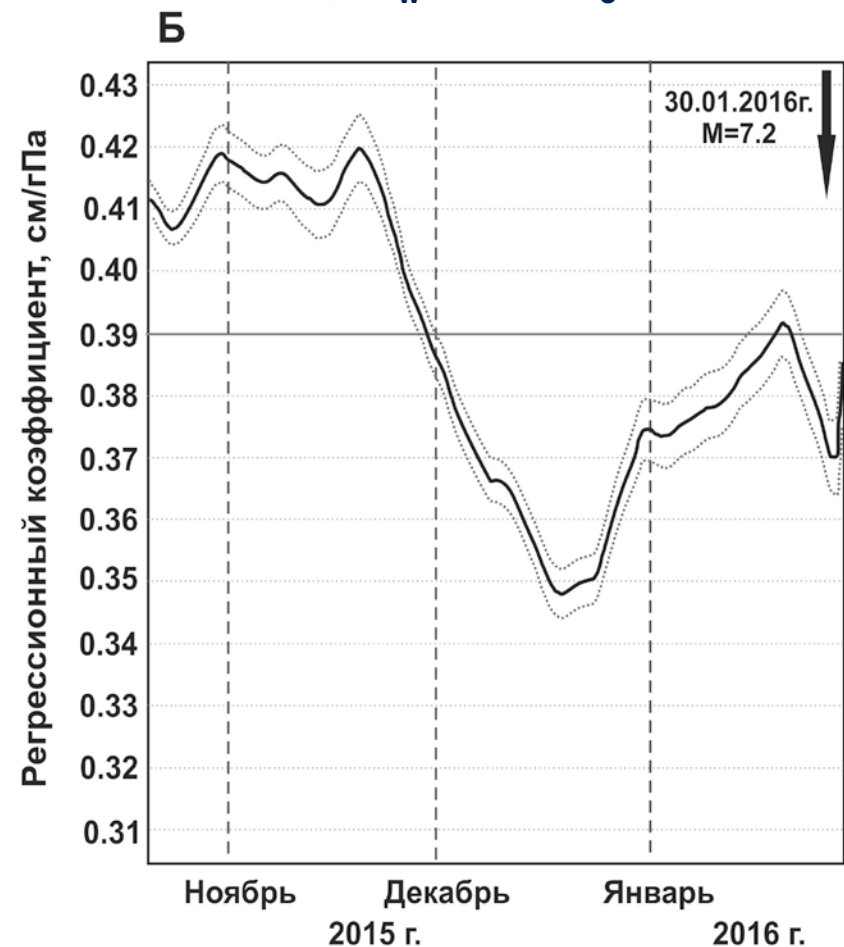
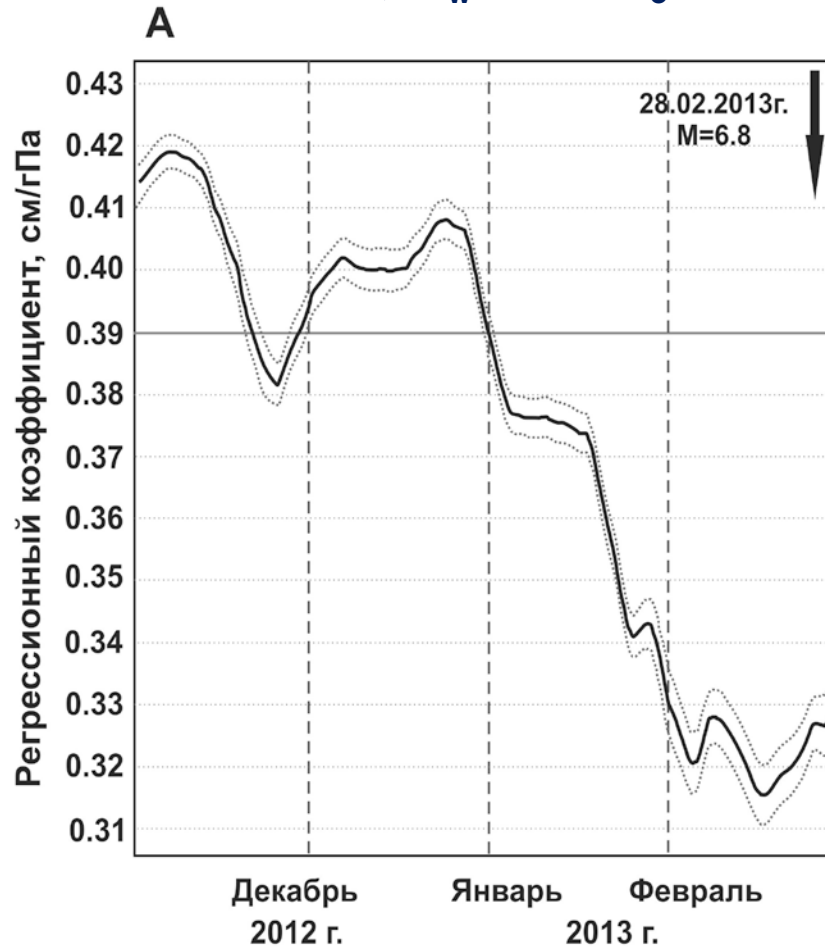


Последовательность переходов между четырьмя кластерами статистических свойств временного ряда уровня воды для фрагментов длиной 1 сут (по вертикальной оси показаны номера кластеров 1-4).



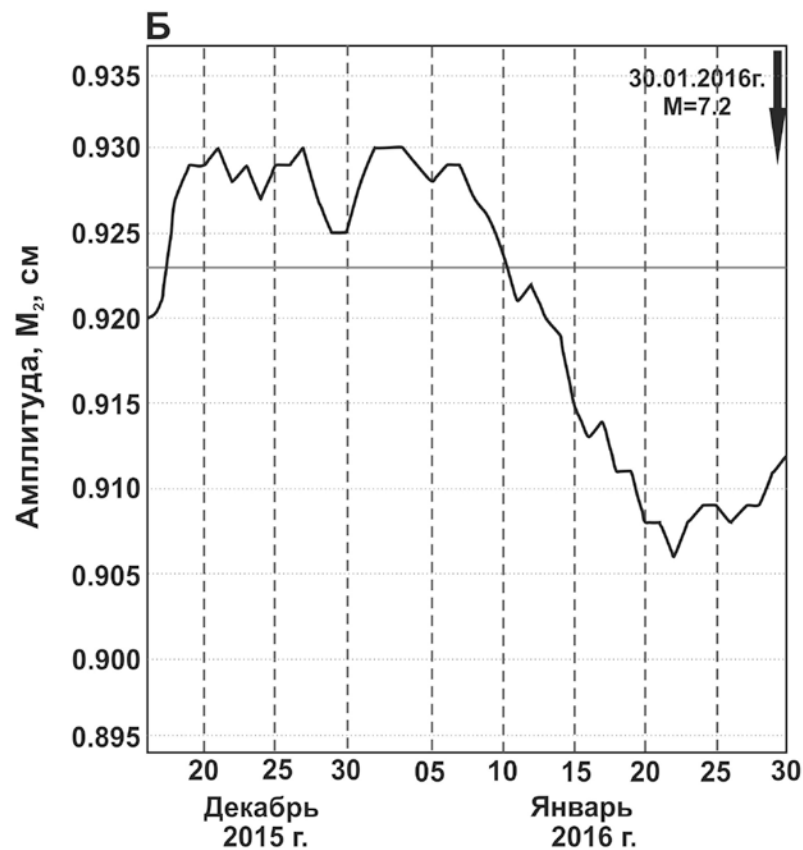
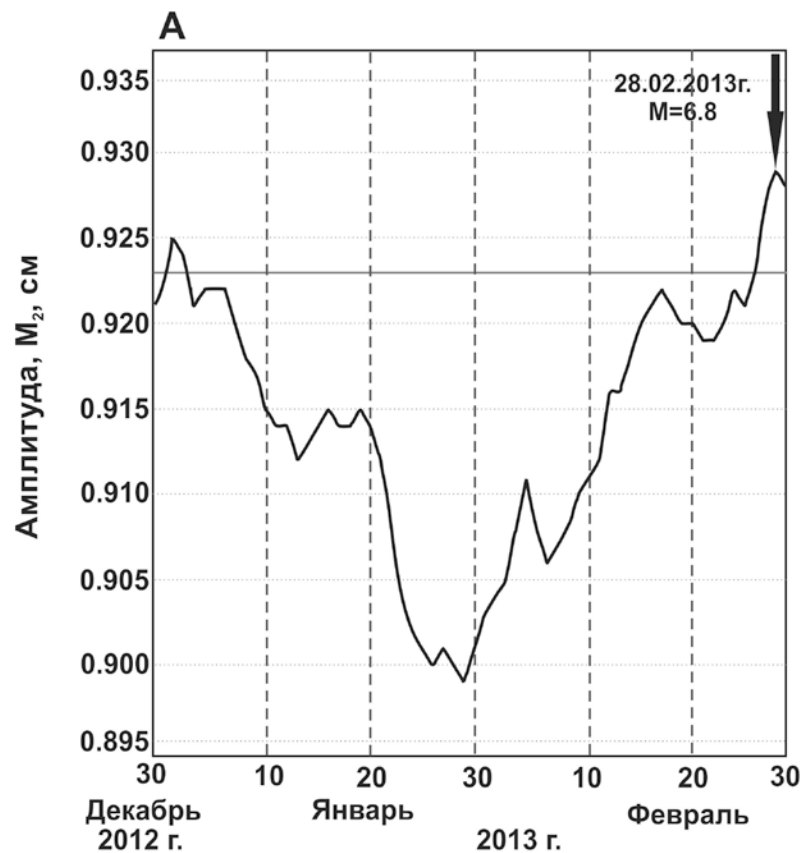
Распределение во времени кластера 1 (а) в сопоставлении с временным рядом вариаций уровня воды (б), сильными землетрясениями (показаны стрелками: 1 – 28.02.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км; 2 – 24.05.2013 г., $M_w = 8.3$, $d_e = 350$ км; 3 – 12.11.2013 г., $M_w = 6.5$, $d_e = 300$ км; 4 – 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км; 5 – 17.07.2017 г., $M_w = 7.8$, $d_e = 700$ км) и датами работ на скважине, сопровождающихся внедрением в ее ствол (показаны серыми крестами)

**Изменение регрессионного коэффициента перед землетрясениями
28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км**



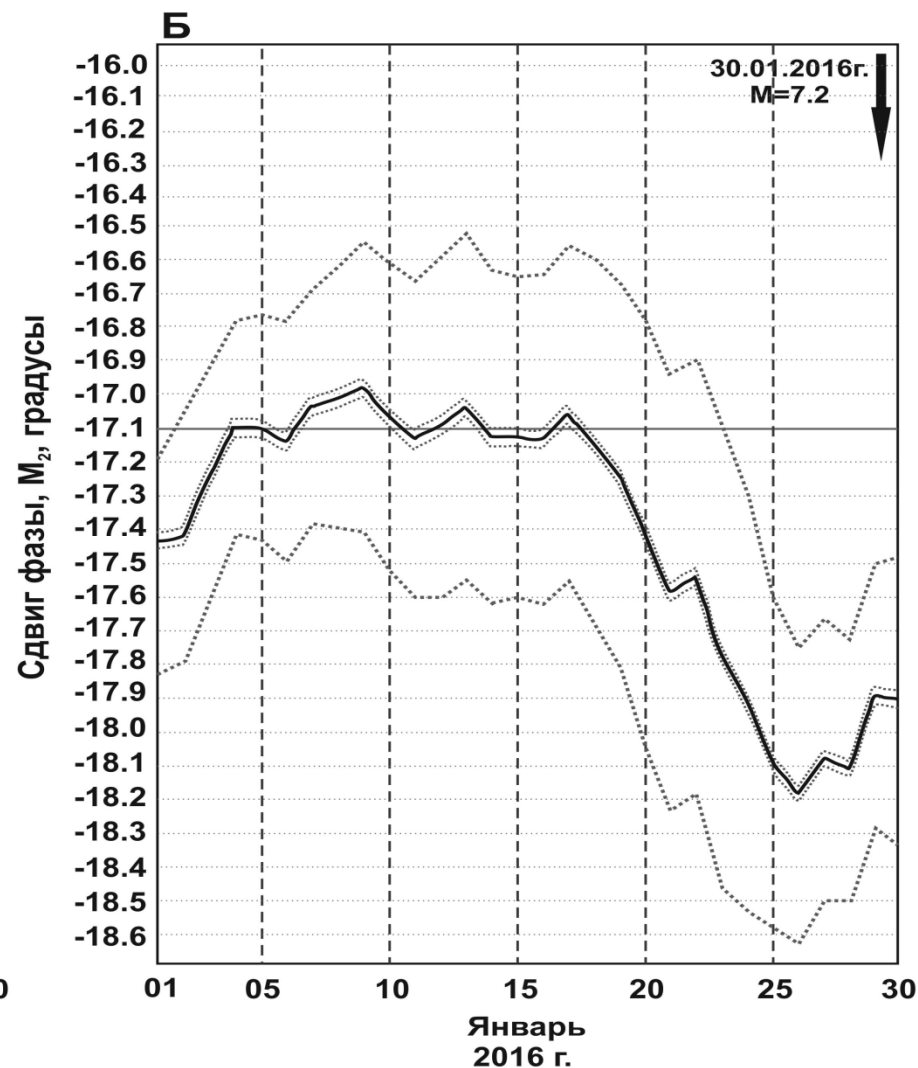
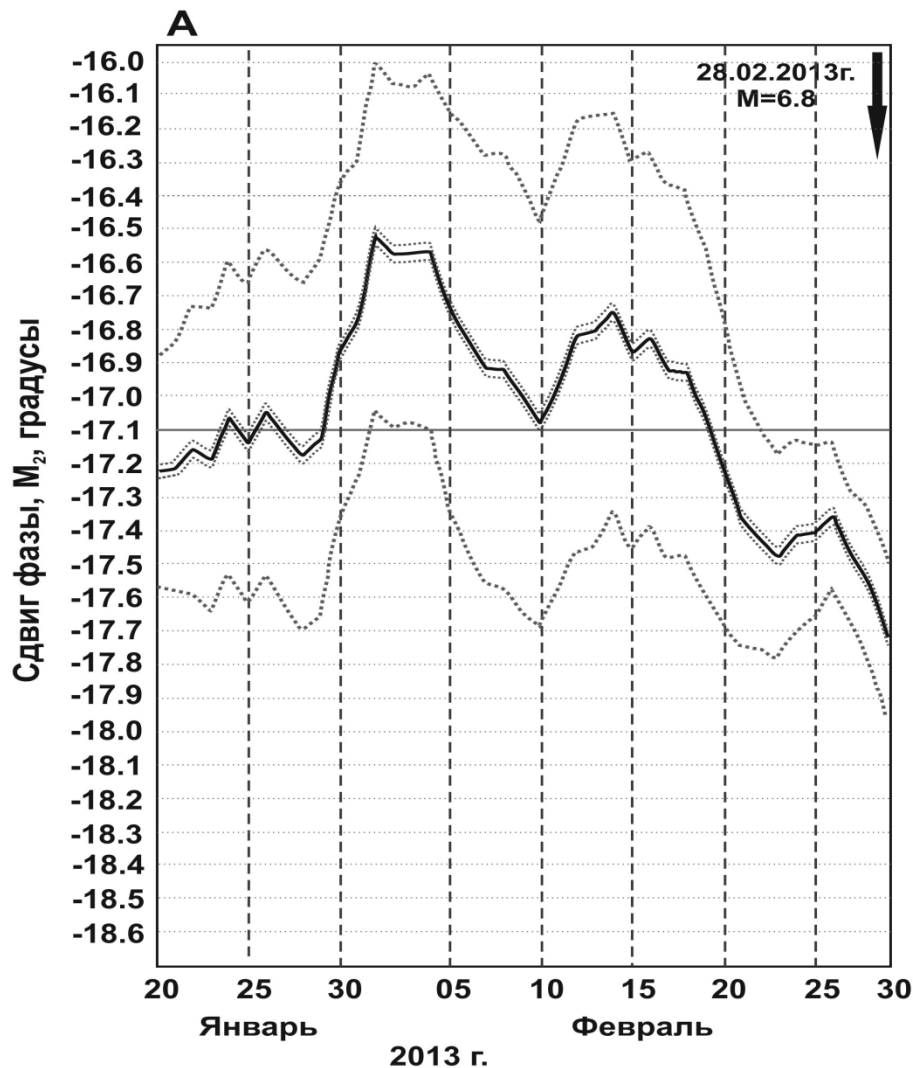
Уменьшение регрессионного коэффициента (РС – черная линия) перед землетрясениями 28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км (А) и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км (Б). Серые линии показывают диапазон определения РС с учетом ошибок определения.

**Изменение амплитуды волны M_2 перед землетрясениями
28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км**



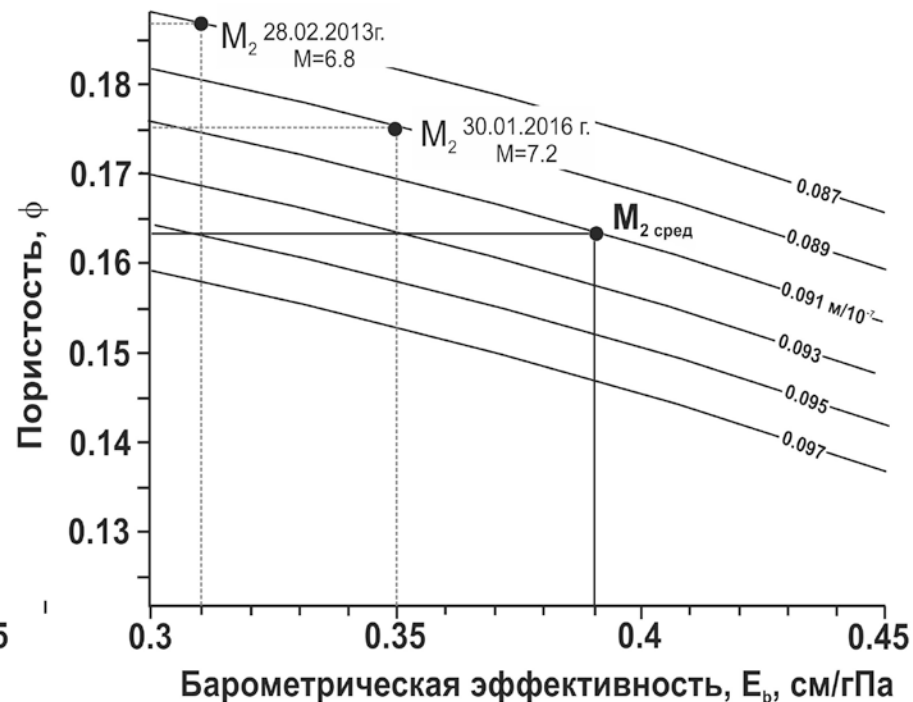
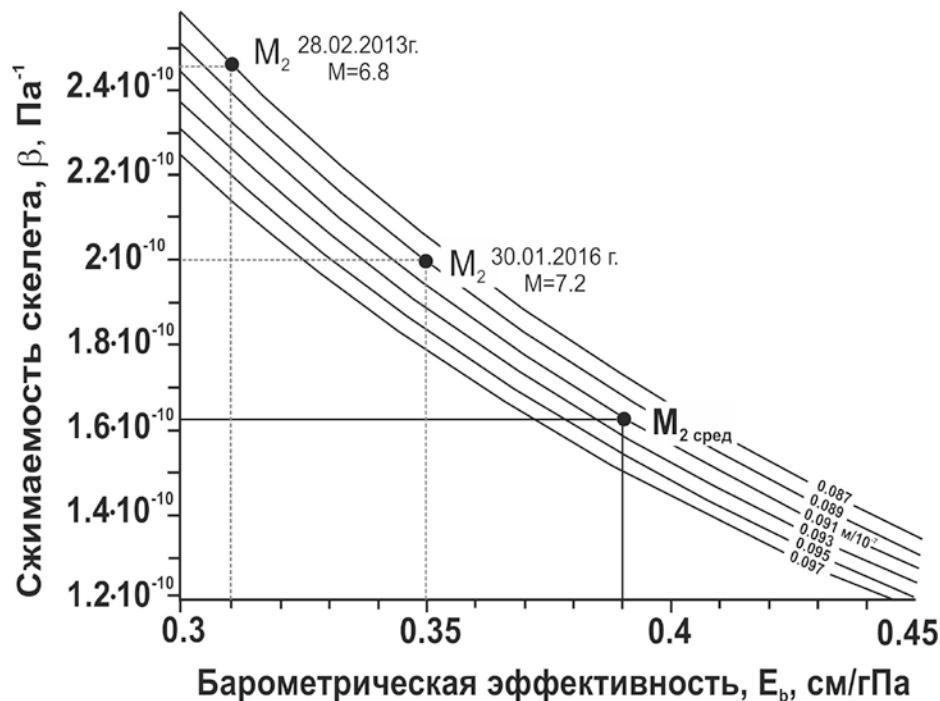
**Уменьшение амплитуды волны M_2 в изменениях уровня воды перед землетрясениями
28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км (А) и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км (Б).**

Изменение фазового сдвига волны M_2 перед землетрясениями 28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км



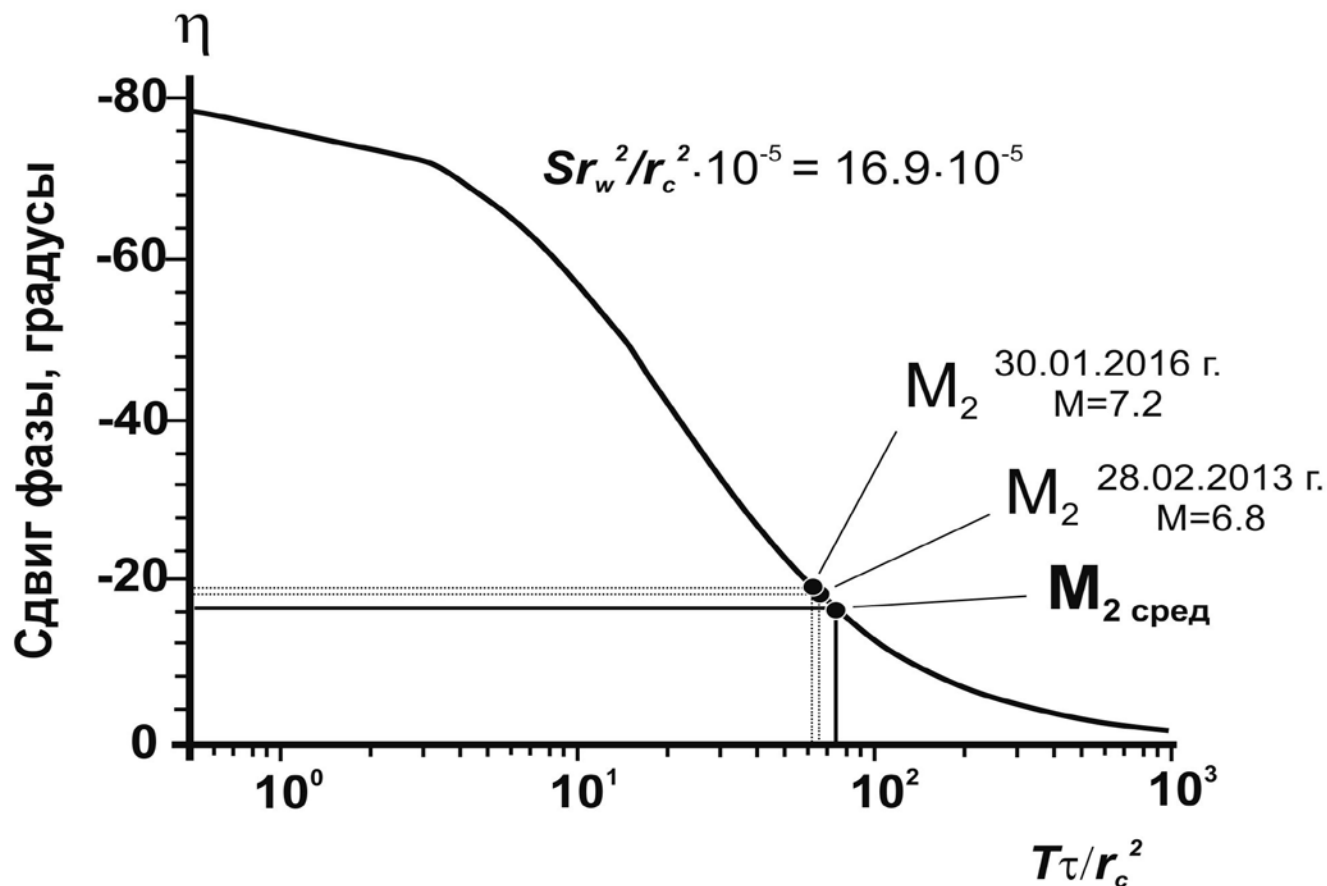
Уменьшение фазового сдвига волны M_2 в изменениях уровня воды перед землетрясениями
28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км (А) и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км (Б).

Связь упругих параметров водовмещающих пород и величин барометрической эффективности E_b и приливной чувствительности уровня воды A_s



Эффект увеличения сжимаемости скелета водовмещающей породы β (слева) и пористости ϕ (справа) при уменьшении величин барометрической эффективности $E_b = RC$ и приливной чувствительности уровня воды A_s по отношению к теоретической площадной деформации в диапазоне величин $0.087-0.097 \text{ м/10}^{-7}$ [2]; M_2 сред – средняя оценка A_s по волне M_2 для всего ряда наблюдений; также показаны величины A_s , оцененные по волне M_2 в периоды, предшествующие землетрясениям 28.02.2013 г и 30.01.2016 г.

Зависимость сдвига фаз между изменениями уровня воды и гармоническими вариациями напора в зависимости от периода, фильтрационных параметров и геометрических размеров скважины.



Изменения фазового сдвига волны M_2 при различных значениях параметра $T\tau/r_c^2$ и $Sr_w^2/r_c^2 = 21.4 \cdot 10^{-5}$ для скв. ЮЗ-5: τ - период волны M_2 (12.42 ч), r_c – радиус скважины в области, где происходят колебания уровня воды, r_w – радиус скважины в области ее связи с водовмещающими породами. При увеличении сдвига фазы происходит смещение оценок параметра $T\tau/r_c^2$ влево.

Заключение

Представлены два новых метода обработки уровнемерных данных с использованием статистического и приливного анализа, которые расширяют возможности использования данных скважинных уровнемерных наблюдений для выделения средне-краткосрочных аномалий гидрогеодинамического режима наблюдательной скважины.

Достоинством метода выделения краткосрочных аномалий гидродинамического режима скважины на основе статистического анализа является возможность выделения скрытых в шуме кратковременных аномальных состояний наблюдательных скважин при оперативной обработке больших массивов уровнемерных данных, что не обеспечивается применением традиционных методов.

С использованием метода приливного анализа многолетних данных уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5 продемонстрированы новые эффекты (возможные предвестники) на стадиях подготовки двух сильных землетрясений, проявляющиеся в уменьшении амплитуды и фазового сдвига волны M_2 и в уменьшении барометрической эффективности вариаций уровня воды в течение первых месяцев. Впервые получены оценки изменчивости упругих и фильтрационных свойств водовмещающих пород на стадиях подготовки сильных землетрясений.

Представленные методы могут найти применение в задачах геофизического мониторинга сейсмоактивных территорий и поиска предвестников землетрясений при оперативной обработке данных уровнемерных наблюдений в скважинах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты №№ 18-05-00337, 18-05-00133.

Спасибо за внимание!